

J. S. ARCHER & C.G. WALL
KEJURUTERAAN
PETROLEUM
PRINSIP DAN AMALAN

Penterjemah
AHMAD KAMAL IDRIS
AZMAN IKHSAN
ISSHAM ISMAIL

PENERBIT
Universiti Teknologi Malaysia
Skudai
Johor Darul Ta'zim
1997

Dibiaya dan diselenggarakan bersama
oleh
RENONG Berhad

©J S Archer and C G Wall, 1986

"This edition of **Petroleum Engineering: Principles and Practice**, First published in 1986 by arrangement with Graham and Trotman Ltd., London and Kluwer Academic Publishers Group, Norwell."

© Edisi bahasa Malaysia dipegang oleh Universiti Teknologi Malaysia, 1997

Hak cipta terpelihara. Tiada dibenarkan mengeluarkan mana-mana bahagian artikel, ilustrasi, dan isi kandungan buku ini dalam apa jua bentuk dan cara apa jua sama ada dengan cara elektronik, fotokopi, mekanik, atau cara lain sebelum mendapat izin bertulis daripada Timbalan Naib Canselor (Pembangunan), Universiti Teknologi Malaysia, Kampus Sekudai, 80990 Johor Darul Ta'zim, Malaysia. Perundingan tertakluk kepada perkiraan royalti atau honorarium.

Perpustakaan Negara Malaysia Data Pengkatalogan-dalam-Penerbitan

Archer, J. S.

Kejuruteraan petroleum : prinsip dan amalan / J. S. Archer dan C. G. Wall ;
penterjemah Ahmad Kamal Idris, Azman Ikhsan, Issham Ismail.
ISBN 983-52-0091-2

1. Petroleum engineering. I. Wall C. G. II. Ahmad Kamal Idris. III. Azman Ikhsan. IV. Issham Ismail.
V. Judul.
622.3382

Editor: Muhammad A. Manan & Ariffin Samsuri
Pereka Kulit: Zalawati Sufian

Diatur huruf oleh / *Type-set by*
VISUAL PRINT SDN. BHD.
68, Mezzanine Floor,
Jalan Putra Off Jalan Raja Laut,
50350 Kuala Lumpur,
WILAYAH PERSEKUTUAN

Diterbitkan di Malaysia oleh / *Published in Malaysia by*
PENERBIT UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA,
UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA
80990 Skudai, Johor Bahru,
Johor Darul Ta'zim, MALAYSIA.

Dicetak di Malaysia oleh / *Printed in Malaysia by*
PERCETAKAN HAJI JANTAN SDN. BHD.
No.12, Jalan 4/118C,
Desa Tun Razak, Cheras, Kuala Lumpur,
WILAYAH PERSEKUTUAN.

Kandungan

| | | |
|---|---|-----------|
| Prakata | | ix |
| Kata pengantar | | xi |
| Bab 1 Pendahuluan | | 1 |
| 1.1 | Kejuruteraan petroleum: Satu teknologi yang kreatif | 1 |
| Bab 2 Reservoir | | 7 |
| 2.1 | Keadaan pembentukan | 7 |
| 2.2 | Tekanan reservoir | 10 |
| 2.3 | Tekanan bendalir di dalam zon hidrokarbon | 12 |
| 2.4 | Suhu reservoir | 13 |
| 2.5 | Sifat semula jadi bendalir reservoir | 14 |
| 2.6 | Data reservoir – sumber | 15 |
| Bab 3 Penggerudian Telaga Minyak | | 21 |
| 3.1 | Operasi | 21 |
| 3.2 | Kos | 24 |
| 3.3 | Pelengkapan telaga dan selongsong telaga minyak | 26 |
| 3.4 | Pelengkapan | 27 |
| 3.5 | Kawalan bendalir penggerudian | 30 |
| 3.6 | Reologi bendalir telaga (lumpur penggerudian dan simen) | 31 |
| 3.7 | Tekanan rekahan formasi dan ujian rekahan | 31 |
| 3.8 | Pemerolehan data semasa penggerudian | 32 |
| 3.9 | Bendalir lumpur untuk perolehan teras | 34 |
| 3.10 | Pengoptimuman penggerudian | 34 |

| | | |
|---|--|------------|
| 3.11 | Turbin lawan putaran lazim | 35 |
| 3.12 | Masalah khas penggerudian | 35 |
| 3.13 | Pelengkapan pengeluaran | 38 |
| BAB 4 Sifat-sifat Bendalir Reservoir | | 42 |
| 4.1 | Isi padu dan tingkah laku fasa sistem hidrokarbon | 42 |
| 4.2 | Penggunaan terhadap sistem lapangan | 43 |
| 4.3 | Kebolehmampatan | 44 |
| 4.4 | Pengukuran dan ramalan sifat-sifat bendalir reservoir | 45 |
| 4.5 | Faktor isi padu formasi, B | 50 |
| 4.6 | Nisbah gas-minyak | 53 |
| 4.7 | Pengukuran langsung – analisis PVT | 54 |
| 4.8 | Sekaitan umum sistem cecair | 57 |
| BAB 5 Ciri-ciri Batuan Reservoir | | 64 |
| 5.1 | Sumber data dan penggunaannya | 64 |
| 5.2 | Keputusan penerasan | 66 |
| 5.3 | Penerasan lazim dan penerasan berarah | 68 |
| 5.4 | Sistem lumpur penerasan | 69 |
| 5.5 | Pengawetan teras | 70 |
| 5.6 | Kawalan tapak telaga | 70 |
| 5.7 | Teras untuk analisis teras khas | 70 |
| 5.8 | Data yang diperoleh daripada teras | 71 |
| 5.9 | Kajian geologi | 71 |
| 5.10 | Analisis teras rutin | 71 |
| 5.11 | Keliangan | 74 |
| 5.12 | Kebolehtelapan | 81 |
| 5.13 | Hubungan antara keliangan dengan kebolehtelapan | 88 |
| BAB 6 Ketepuan Bendalir: Pengaruh kebolehbasaan dan tekanan rerambut | | 96 |
| 6.1 | Keadaan keseimbangan | 96 |
| 6.2 | Pengukuran makmal dan hubungan dengan sistem reservoir | 97 |
| 6.3 | Taburan saiz liang | 101 |
| 6.4 | Histeresis tekanan rerambut | 101 |
| 6.5 | Taburan ketepuan dalam jeda reservoir | 102 |
| 6.6 | Sekaitan data tekanan rerambut daripada jenis batuan yang diberi | 103 |
| BAB 7 Kebolehtelapan relatif dan aliran berbilang fasa di dalam media berliang | | 107 |
| 7.1 | Takrifan | 107 |
| 7.2 | Aliran pecahan | 109 |
| 7.3 | Kesan perubahan kebolehtelapan | 111 |
| 7.4 | Kesan kebolehbasaan | 113 |
| 7.5 | Penentuan di makmal data kebolehtelapan relatif | 114 |
| 7.6 | Ketepuan baki | 116 |
| 7.7 | Kawalan kebolehbasaan <i>di tempat</i> | 117 |

KANDUNGAN**vii**

| | | |
|------|---|-----|
| 7.8 | Kebolehtelapan relatif daripada sekaitan | 118 |
| 7.9 | Pengesahan data kebolehtelapan relatif untuk digunakan dalam perhitungan penyesaran | 119 |
| 7.10 | Pseudo kebolehtelapan relatif dalam sistem dinamik | 119 |
| 7.11 | Fungsi pseudo kebolehtelapan relatif statik | 121 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| BAB 8 | Pembentangan anggaran isi padu dan simpanan boleh diperoleh | 128 |
|--------------|--|------------|

| | | |
|------|---|-----|
| 8.1 | Isi padu setempat | 128 |
| 8.2 | Jangkauan keluasan reservoir | 128 |
| 8.3 | Peta ketebalan | 130 |
| 8.4 | Pembentangan litofasies | 131 |
| 8.5 | Peta sekeliangan | 131 |
| 8.6 | Peta semuatan | 132 |
| 8.7 | Peta isi padu liang hidrokarbon | 132 |
| 8.8 | Anggaran kebarangkalian | 133 |
| 8.9 | Faktor perolehan dan simpanan | 135 |
| 8.10 | Taburan ekuiti di dalam reservoir petroleum | 136 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| BAB 9 | Analisis Aliran Jejarian Untuk Prestasi Telaga | 140 |
|--------------|---|------------|

| | | |
|------|---|-----|
| 9.1 | Aliran jejarian dalam sistem yang mudah | 140 |
| 9.2 | Pembangunan penyelesaian sumber garisan | 141 |
| 9.3 | Persamaan jejarian dalam unit praktik | 142 |
| 9.4 | Penerapan penyelesaian analitik untuk kaedah ujian telaga | 142 |
| 9.5 | Analisis tokokan tekanan | 145 |
| 9.6 | Kesan kulit | 146 |
| 9.7 | Susutan aras tekanan dan pengujian batas reservoir | 148 |
| 9.8 | Pengujian telaga gas | 149 |
| 9.9 | Tatacara ujian telaga | 151 |
| 9.10 | Pengujian telaga dan analisis tekanan | 158 |

| | | |
|---------------|------------------------------------|------------|
| BAB 10 | Analisis Prestasi Reservoir | 164 |
|---------------|------------------------------------|------------|

| | | |
|------|---|-----|
| 10.1 | Perolehan dari reservoir gas | 164 |
| 10.2 | Perolehan primer di dalam reservoir minyak | 166 |
| 10.3 | Pemisahan graviti dan kecekapan perolehan | 171 |
| 10.4 | Keseimbangan bahan untuk reservoir dengan kemasukan air atau suntikan air | 172 |
| 10.5 | Ketepatan persamaan imbalan bahan | 176 |

| | | |
|---------------|--|------------|
| BAB 11 | Perolehan Sekunder dan Pengekalan Tekanan | 181 |
|---------------|--|------------|

| | | |
|------|--|-----|
| 11.1 | Prinsip penyesaran | 182 |
| 11.2 | Faktor yang mempengaruhi skema perolehan sekunder dan pengekalan tekanan | 183 |
| 11.3 | Kualiti bendalir suntikan dan pembuangan air garam | 191 |

| | |
|--|----------------|
| BAB 12 Perolehan Hidrokarbon Tertingkat | 199 |
| 12.1 Objektif | 199 |
| 12.2 Pengaruh mekanisme perolehan terhadap minyak baki | 199 |
| 12.3 Pembaikan kebolehtelapan | 202 |
| 12.4 Mekanisme penyesaran boleh larut campur | 202 |
| 12.5 Penggunaan banjiran boleh larut campur | 204 |
| 12.6 Proses banjiran kimia | 204 |
| 12.7 Perolehan minyak berat | 208 |
| 12.8 Tenaga terma | 213 |
| 12.9 Reservoir peluwap gas | 217 |
| 12.10 Reservoir minyak meruap | 220 |
| BAB 13 Faktor yang Mempengaruhi Operasi Pengeluaran | 227 |
| 13.1 Sistem pengeluaran | 227 |
| 13.2 Tingkah laku reservoir dalam kejuruteraan pengeluaran | 229 |
| 13.3 Aliran lubang telaga | 230 |
| 13.4 Kemudahan proses di lapangan | 233 |
| 13.5 Pemprosesan gas asli | 233 |
| 13.6 Pemprosesan minyak mentah | 235 |
| 13.7 Pemprosesan minyak berat | 237 |
| 13.8 Perawatan air pengeluaran | 238 |
| 13.9 Perawatan air suntikan | 238 |
| 13.10 Pemeteran minyak mentah | 239 |
| BAB 14 Konsep Pemodelan Reservoir dan Penggunaannya dalam Perancangan Pembangunan | 243 |
| 14.1 Model | 243 |
| 14.2 Persamaan aliran berbilang fasa | 244 |
| 14.3 Pengelasan penyelaku | 245 |
| 14.4 Penggunaan penyelaku | 245 |
| 14.5 Pemerihalan reservoir dalam pemodelan | 249 |
| 14.6 Penggunaan model reservoir dalam pembangunan lapangan | 258 |
| Lampiran 1 Tatanama SPE dan Unit SPE | 268 |
| Unit | 268 |
| Simbol piawai SPE | 270 |
| Simbol yang diabad oleh kuantiti fizikal | 279 |
| Abjad subskrip mengikut kuantiti fizikal | 314 |
| Lampiran 2 Penyelesaian Contoh-contoh dalam teks | 325 |
| Indeks | 375 |

Bab 1

Pendahuluan

1.1 KEJURUTERAAN PETROLEUM: SATU TEKNOLOGI YANG KREATIF

Fungsi kejuruteraan petroleum adalah menyediakan asas perancangan dan pelaksanaan teknik-teknik untuk memperoleh petroleum semula jadi dalam kuantiti yang komersial. Untuk itu diperlukan asas teknologi yang luas; merangkumi asas kejuruteraan, geologi, matematik, fizik, kimia, ekonomi dan geostatistik. Sebagai satu mata pelajaran kejuruteraan, agak janggal kerana perancangan dibuat berdasarkan pemerhatian terhadap prestasi pengeluaran serta gambaran tentang reservoir yang disimpulkan daripada sampel yang terbatas. Tidak seperti cabang kejuruteraan lain, reservoir tidak boleh direka bentuk untuk memenuhi sesuatu tugas, tetapi lebih merupakan suatu reservoir yang terbentuk secara semula jadi, dan tidak ditakrif dengan baik untuk mengeluarkan sebahagian daripada kandungannya secara komersial. Dengan berlalunya masa dan pengeluaran bertokok, lebih banyak maklumat tentang sifat reservoir boleh dikumpulkan dan kaedah pengeluaran dapat diubah suai. Untuk itu kejuruteraan petroleum boleh digambarkan sebagai satu latihan yang menerapkan penggunaan ketidakpastian dalam reka bentuk. Satu contoh aliran penyelesaian masalah dalam kejuruteraan petroleum ditunjukkan di dalam Jadual 1.1 yang dipadankan daripada Timmermen^[15]. Istilah yang digunakan mengandungi pelbagai tahap keyakinan

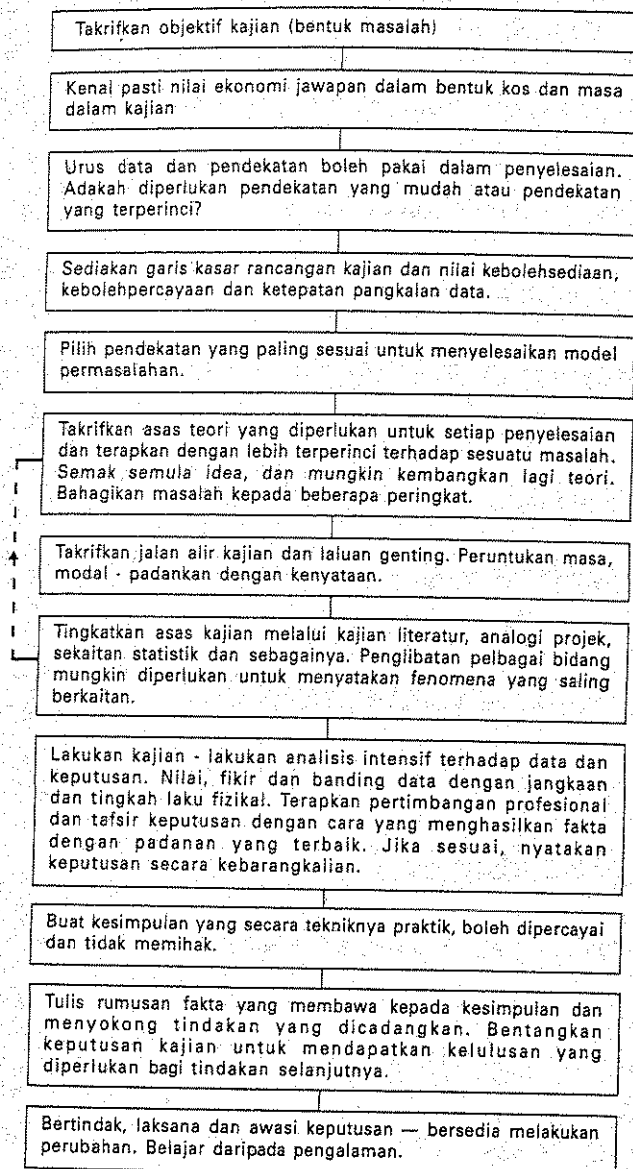
dalam menyatakan sumber di tempat dan sumber boleh diperolehi. Dalam Bab 8 kita bincangkan tentang kuantiti hidrokarbon yang “terbukti” dalam aspek kebolehsediaan maklumat dan kewujudan teknologi untuk mendapatkan perolehan secara komersial yang menarik. Daripada sudut ekonomi, proses perolehan hidrokarbon tidak dapat dipisahkan daripada amalan dalam kejuruteraan petroleum. Untuk projek tertentu, seorang jurutera petroleum mempunyai tanggungjawab memberikan analisis rancangan yang menarik, baik daripada sudut teknikal mahupun kewangan.

Dengan peningkatan usaha penjelajahan reservoir yang lebih dalam dan peningkatan eksploitasi reservoir lepas pantai di lembangan sedimen dunia (Rajah 1.1), kos pengeluaran adalah penting. Sebagai contoh, daripada sudut kos sebelum cukai bagi pengeluaran minyak dari telaga di daratan pada kedalaman 2000 mSS dibandingkan dengan telaga lepas pantai pada kedalaman 3000 mSS ialah dijangka pada nisbah 1:10. Pada masa ini kerja-kerja penjelajahan kawasan hidrokarbon sedang matang ditumpukan pada mekanisme pemerangkapan yang tidak ketara berbanding dengan struktur *tinggi*, dan pada penumpukan yang lebih kecil. Perolehan hidrokarbon selanjutnya dari reservoir yang menuju ke penghujung proses pembangunan lazimnya memerlukan penggunaan proses-proses perolehan hidrokarbon *tertingkat* (EOR) atau diperbaiki (IHR). Eksploitasi reservoir minyak berat (graviti API kurang daripada 20° API),



Rajah 1.1 Lembangan sedimen dunia.

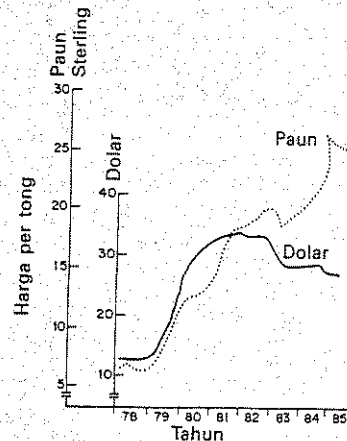
1 PENDAHULUAN



Jadual 1.1 Penyelesaian masalah kejuruteraan petroleum.

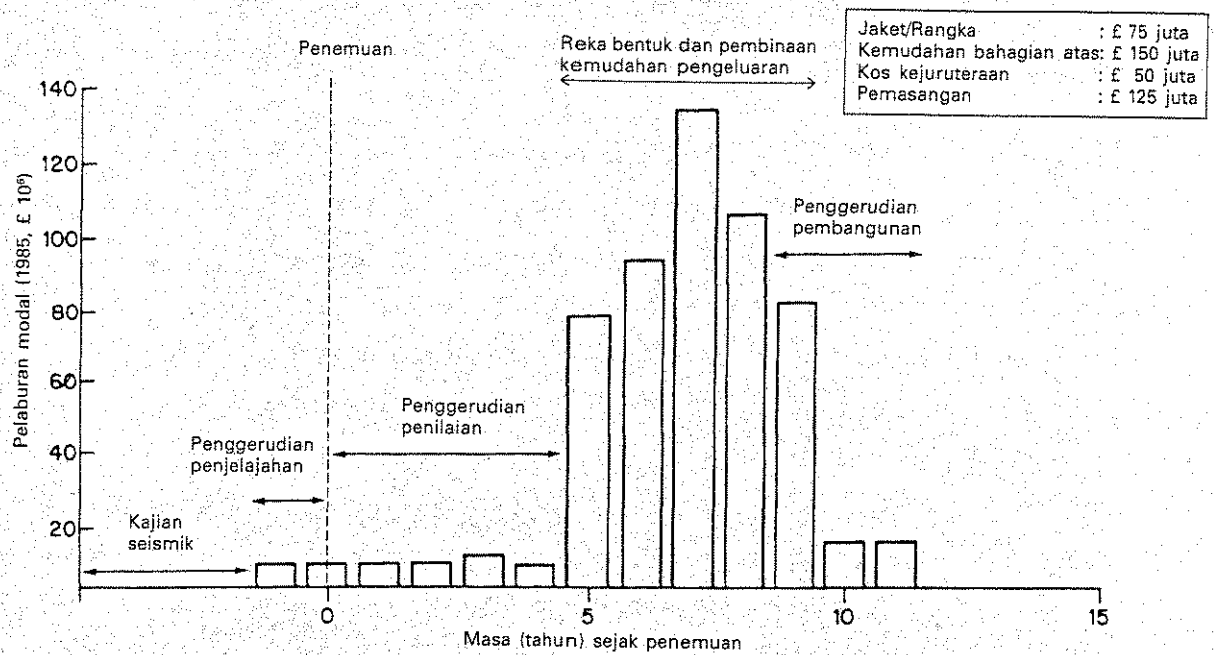
reservoir peluwap gas dan reservoir minyak meruwap (graviti API lebih besar daripada 45° API) memerlukan pendekatan kejuruteraan petroleum yang khusus, terutamanya di dalam reservoir bertekanan tinggi atau lepas pantai. Pembangunan perolehan hidrokarbon daripada batu pasir minyak dan syal minyak memerlukan kaedah kejuruteraan petroleum digabungkan dengan teknologi jurutera lombong dan kimia.

Persekitaran fiskal masa ini, terutamanya di Barat Laut Eropah, telah meningkatkan kesedaran ekonomi dan politik jurutera petroleum. Harga minyak dalam pasaran dunia sebahagiannya dikawal oleh

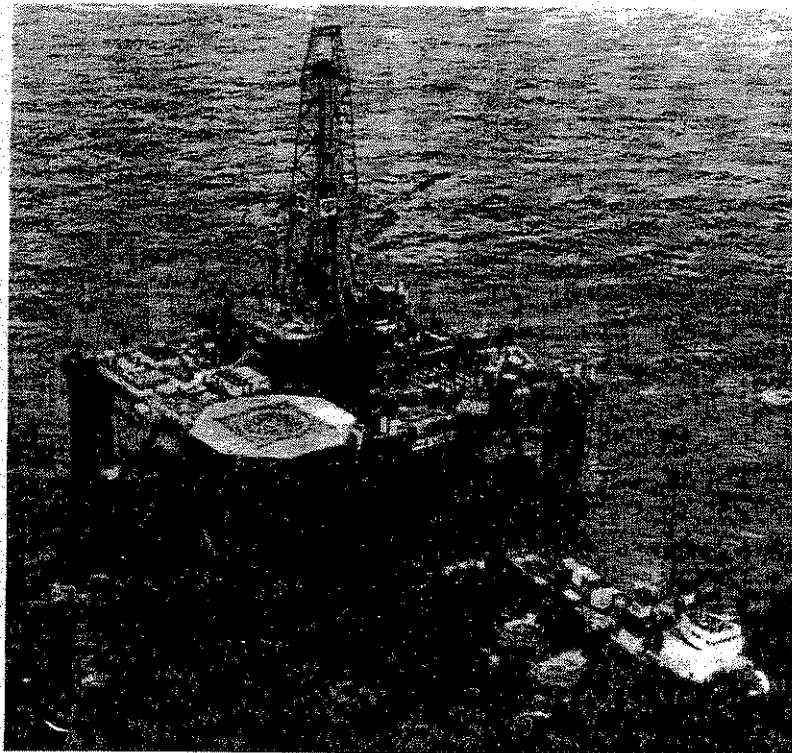


Rajah 1.2 Perubahan harga purata minyak mentah Timur Tengah.

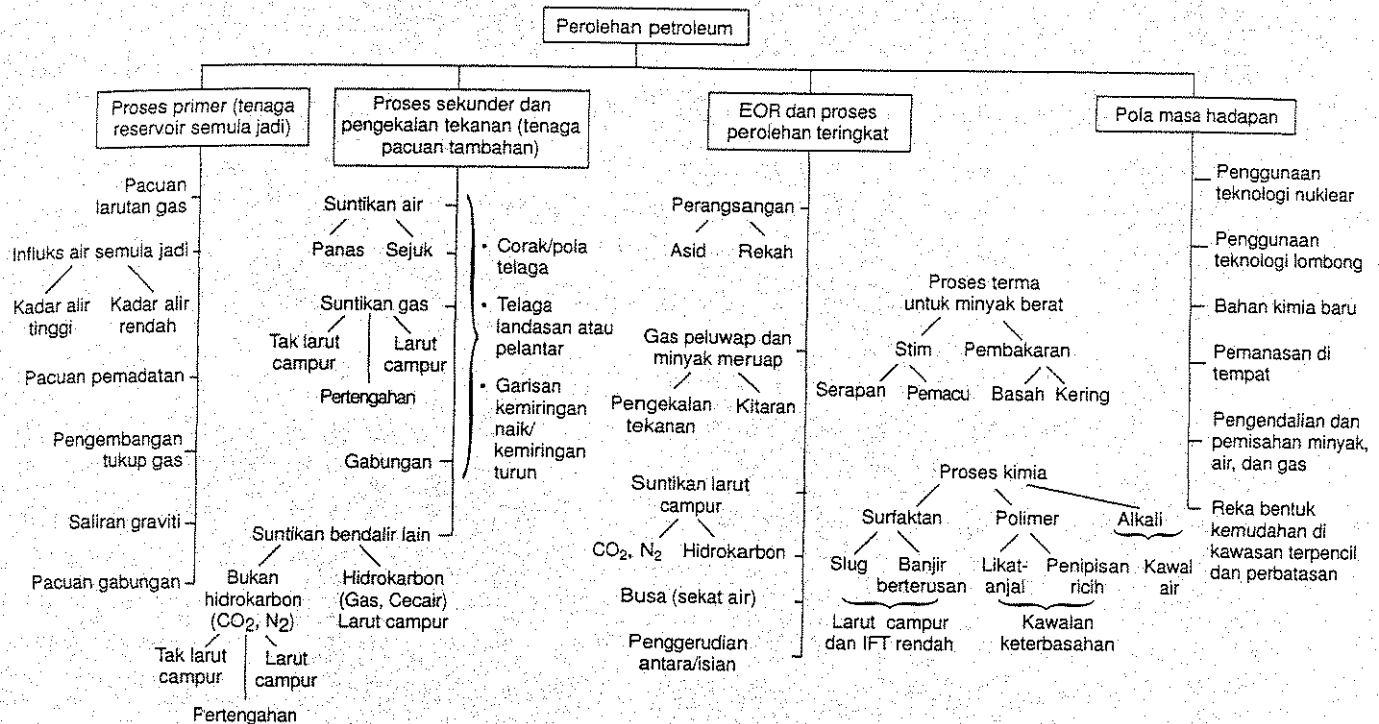
perjanjian antara negara-negara pengeluar. Rajah 1.2 menunjukkan turun naiknya harga rasmi purata minyak mentah Timur Tengah, yang dikumpulkan daripada *Petroleum Intelligence Weekly*. Jelas kelihatan kesan daripada turun naiknya kadar pertukaran antara paun sterling dan dolar Amerika. Perubahan ini mempengaruhi polisi eksploitasi syarikat-syarikat pengendali. Kos pembangunan reservoir pada amnya memerlukan syarikat pengendali mengumpul dana dalam bentuk pinjaman dengan banyak. Syarat pembayaran semula dikaitkan dengan kenyataan ketidakpastian pengeluaran reservoir. Profil kos, pembangunan lapangan minyak lepas pantai di Pentas Benua (UKCS) dengan minyak boleh peroleh sebesar 75 juta tong ditunjukkan di dalam Rajah 1.3. Pelaburan melebihi 500 juta paun mengikut nilai wang tahun 1985, atau jika mengikut kadar pertukaran pada pertengahan tahun 1985, nilainya melebihi US\$600 juta. Dari rajah ini sangat jelas kelihatan bahawa banyak pelaburan digunakan paling tidak dalam tempoh lima tahun sebelum sebarang pendapatan pengeluaran. Fakta ini saja sudah cukup untuk membawa kriteria perancangan supaya kejuruteraan petroleum menghasilkan kadar pengeluaran awal yang tinggi, untuk memendekkan masa bayar balik. Pembangunan lapangan minyak lepas pantai di UKCS dengan simpanan boleh peroleh kurang daripada 100 juta tong seharusnya memberikan cabaran yang lebih besar kepada jurutera petroleum berbanding dengan pembangunan lapangan pada penghujung tahun 1983, dengan simpanan boleh peroleh purata sekitar 400 juta tong setiap reservoir.



Rajah 1.3 Profil perbelanjaan modal untuk satu penemuan hipotetikal minyak lepas pantai UKCS 1985 dengan minyak boleh peroleh sebanyak 75 juta tongki stok.



Rajah 1.4 Penjelajahan lepas pantai menggunakan rig separuh tenggelam *Sea Conquest*. (Foto ihsan daripada BP).



Rajah 1.5 Kaedah-kaedah perolehan petroleum.

Rujukan

- [1] *International Petroleum Engineering Encyclopedia*
Pennwell Publish. Co. Tulsa (1983).
- [2] British Petroleum Company plc
BP Statistical Review of World Energy (Jun 1984).
- [3] Department of Energy
Development of the oil and gas resources of the United Kingdom (the Brown Book), Pub. D. En. 1983 and annually.
- [4] Esso UK plc
Opportunities for British Industry (1984).
- [5] UK Offshore Operators Association
Potential Oil and Gas Production from the UK Offshore to the Year 2000, Kertas Kerja Teknikal (Sept. 1984).
- [6] Brush, R.M. dan Marsden, S.S.
Bias in engineering estimation, JPT (1982) 433.
- [7] Marks, V.E.
Further small offshore oilfield developments, SPE Paper 12988, *Proc. Europec* (1984), 265.
- [8] Underdown, D.J.
The role of taxation in optimising the exploitation of the UK continental shelf, SPE Paper 13008, *Proc. Europec* (1984), 407.
- [9] Archer, J.S.
Reservoir definition and characterisation for analysis and simulation, *Proc. 11th World Pet. Cong.*, London (1983), Paper PD6(1).
- [10] Perrodon, A.
Dynamics of oil and gas accumulations, *Elf Aquitaine*, Mem 5. Pau 1983.
- [11] Master, C.D.
Distribution and quantitative assessment of world petroleum reserves and resources, *Proc. 11th World Pet. Cong.* (1983), Paper PD11(1).

- [12] Hertz, D.B.
Risk analysis in capital investment, *Harvard Business Review* (Jan. – Feb. 1984) and in *Pet. Trans.* Reprint Series 3, SPE of AIME (1970), 176.
- [13] Northern, I.G.
Investment decisions in petroleum exploration and production, *JPT* (Julai 1964), 727.
- [14] Attanasi, E.D. dan Haynes, J.L.
Economics and appraisal of conventional oil and gas (in the Western Gulf of Mexico), *JPT* (Dis. 1984), 2171.
- [15] Timmerman, E.H.
Practical Reservoir Engineering, Pennwell Publishing, Tulsa (1982), 2 jld.
- [16] Parra, F.R.
Financial requirements and methods of financing petroleum operations in developing countries. *Proc. UN Conf., Petroleum Exploration Strategies in Developing Countries*, The Hague (1981), Graham & Trotman 177–192.